

# メタマテリアルの物理

富田 知志

奈良先端科学技術大学院大学

 メタマテリアル, 屈折率, インピーダンス, 伝送線路, フォトニック結晶

## 1. はじめに

本稿は幾つかの具体例を通して、メタマテリアル（メタ物質, metamaterials）の考え方や原理を簡潔に紹介することを旨とする。以下では特に断らない限り、マイクロ波や可視光などの電磁波を操る光メタマテリアルを想定して話を進める。しかしながら、メタマテリアルは近年、電磁波以外の波動現象（音波、弾性波、地震波）や拡散現象（熱伝導）にも射程範囲を拡げていることは特筆に値する。これらメタマテリアルの多様性については最終節で紹介する予定である。そこへ至る道のりで、第2章ではメタマテリアルの定義・具体例を紹介し、それを基に第3章ではメタマテリアルの原理、他の分野との関係について考える。さらに筆者らの最近の取り組みについては第4章で紹介する。

## 2. メタマテリアルとはなんだろうか

### 2.1 メタマテリアルの定義

メタマテリアルに明確な定義は存在しない。とはいえ「ニンジンがメタマテリアルか」と問われると「否」と答えざるを得ない。語源を遡ると、接頭語の「メタ」はギリシア語起源で「より高い」や「超える」を意味する。メタデータやメタ言語、有機化学での配位子の位置を表すオルト・メタ・パラでもおなじみである。つまりは「天然の物質を超える機能を示す物質」というのが最も広い定義である。では具体的なイメージをつかんでもらい、もう少し定義を狭めるために、以下でメタマテリアルの代表例を幾つか見ていく。

### 2.2 例1：負屈折率メタマテリアル

お風呂でお湯に浸けた腕が曲がって見えることがある。これは光の屈折に起因する。ある媒質から異なる媒質に光が侵入するとき、光が屈折する程度を媒質の屈折率と呼ぶ（Snellの法則）。1964年に当時ソビエト連邦のVeselagoは、誘電率と透磁率が同時に負になり、結果として屈折率が負になったら何が起こるかを考えた<sup>(1)</sup>。そして負屈折率媒質では光が「くの字型」に曲がるので単なる板がレンズになり、波数ベクトルとポインティングベクトルが反平行になる（バックワード波）のでドップラー効果やチェレン

コフ放射が逆転するという興味深い予言を残した。通常の右手系とは異なり、光の電界と磁界と波数ベクトルが左手の関係となる負屈折率媒質は左手系と呼ばれたりもする。ただしこの呼び方は、第4章で登場する鏡像異性体（カイラリティ）での右手・左手と紛らわしいので注意が必要である。

残念ながら天然の物質、例えばレンズを作るガラスやミラーを作る金属、では屈折率は負にならない。ところが2001年にアメリカのSmithらが実現したメタマテリアルでは、波長数cm程度のマイクロ波に対して実効的屈折率が負になることが実験的に示された<sup>(2)</sup>。図1(a)に示すように彼らのメタマテリアルは、イギリスのPendryらが提案した、銅でできた数mm程度の大きさのC字型スプリットリング共振器<sup>(3)</sup>とワイヤ<sup>(4)</sup>で構成されている。スプリットリング共振器はマイクロ波の交流磁界に応答（磁気応答）し、有効透磁率を負にする。一方、電気応答を表す有効誘電率はワイヤによって負にする。結果としてそれらの平方根の積である屈折率が実効的に負になる。図1(b)に示すようにテフロンに比べて確かにマイクロ波は負の方向に屈折している<sup>(5)</sup>。

### 2.3 例2：メタマテリアル隠れ蓑

Smithらは2006年に、メタマテリアルを用いたクローク（外套、日本風には隠れ蓑）を実現した<sup>(6)</sup>。マイクロ波に対する隠れ蓑は、多数の銅スプリットリング共振器で構成されたドーナツ状の構造である。各リング共振器は微妙にデザインが変化しており、ドーナツの胴径方向に正の値の透磁率が連続的に変化する。隠したい物体をドーナツ中心の空洞に置き、マイクロ波を照射する。するとマイクロ

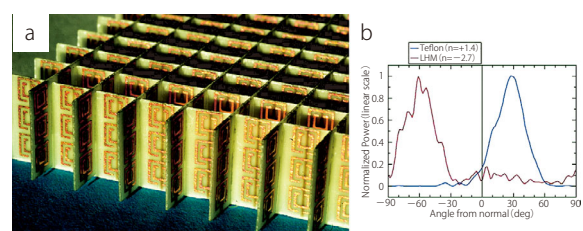


図1 (a) 負屈折率メタマテリアルと (b) マイクロ波屈折パターン<sup>(5)</sup> (AAASより許可を得て転載)

波が、ちょうど岩によって川が別れた後にまた合流するように、物体をすり抜ける。これによりドーナツの向こう側の観測者にはあたかも物体が存在しないように見える。このような手法は重力レンズの考え方に大変良く似ており、変換光学 (Transformation Optics) と呼ばれる。ただしこの隠れ蓑に入ってしまうと、外から中が見えない代わりに中から外も見えないので、我々が想像する隠れ蓑とは少々異なる。

### 3. メタマテリアルの原理

#### 3.1 ありふれた小さなものを工夫して組み合わせる

二つの具体例に共通する考え方は以下のように整理できる：①電磁波の波長よりも小さな構成要素 (メタ原子) を用いる、②メタ原子は銅などありふれた材料からなる、③しかしながらメタ原子の構造・形状・配向を工夫・制御することで電磁波に対して特殊な応答をさせる (誘電率や透磁率の精密制御)、④異なるメタ原子による応答を組み合わせる天然物質では困難な機能 (負屈折率、隠れ蓑) を実現する。つまり、メタマテリアルは「波長よりも十分小さな構成要素を工夫して組み合わせる天然物質では困難な機能を実現する人工構造物質」といえそうだ。

それぞれ①に関しては、自由空間での波長の1/10程度の小ささであれば連続的な一様媒質とみなせると考えられている。②に関しては、鉄やニッケルなど磁性体では電子スピンのマイクロ波の交流磁界に反応して磁気応答 (強磁性共鳴) するが、銅は非磁性体なので磁気応答しない。しかし③のようにメタ原子設計の自由度を利用してリングを形成し、二重の入れ子構造にすることで、インダクタンスやキャパシタンスを導入しLC共鳴を起こすことができる。さらにマイクロ波の交流磁界がリングを貫くような配向にすると、それは磁気共鳴になる。天然の材料では電気応答も磁気応答も同じ電子が担い、それぞれの応答が異なる周波数で狭帯域に起きるため、誘電率と透磁率が同時に負になることがない。一方④のようにメタマテリアルでは、異なるメタ原子に誘電率や透磁率などを別々に担わせて、それらを組み合わせることで、負屈折率や隠れ蓑が存在するように光が振る舞う。誘電率と透磁率を独立して制御できるので、屈折率が異なってもインピーダンスが整合する完全吸収体<sup>(7)</sup>なども実現可能である。

#### 3.2 物質の電気回路化

これまでの説明でLC共鳴やインピーダンス整合など、電気回路で登場する用語が幾つか登場した。実際メタマテリアルは、人間の見た目には回路のような姿をしている。のみならずメタマテリアルは電気回路で記述できる<sup>(8)</sup>。図1(a)にあった二重スプリットリング共振器の等価回路は

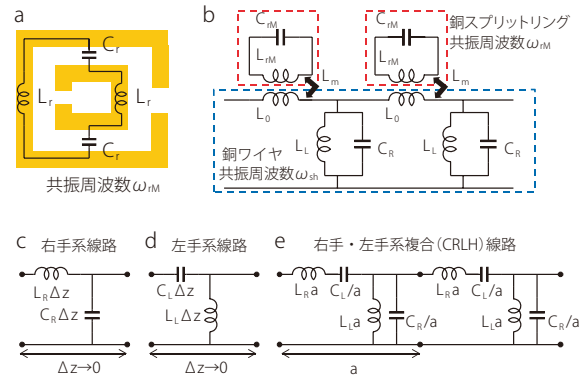


図2 スプリットリング共振器 (a) と負屈折率メタマテリアル (b) の等価回路。(c) 右手系伝送線路、(d) 左手系伝送線路、(e) 右手・左手系複合線路

図2(a) となり、LC共振器として描けることが分かる。リング共振器とワイヤの相互作用を小さくし、組み合わせた負屈折率メタマテリアルの等価回路は図2(b)のように描ける。

本稿で紹介するメタマテリアルは、共振器を主なメタ原子としている。共鳴を用いるので本質的に狭帯域の現象であり、かつ損失が大きな問題となる。また互いの機能を邪魔しないように、メタ原子間の相互作用は小さくする必要があるので。これに対して構成要素間の相互作用を強くする代わりに、共振器を用いない方法 (伝送線路アプローチ) も知られている。図2(c) は非分散性の分布定数線路で表された通常 (右手系) の伝送線路である。このLとCを入れ替えた双対回路 (図2d) では、負屈折率 (バックワード波) を得ることができ理想的左手系伝送線路と呼ばれる。しかしこの実装段階では必ず寄生容量が入ってくるので、実際は図2(e) に示されるような右手・左手系複合 (CRLH) 伝送線路となる。直列枝と並列枝の共振周波数が一致したバランス型CRLH伝送線路は、波数空間でのΓ点でフォトリックバンドが交差し、固体物理でのグラフェンとのアナロジーなどで大変興味深い存在である。このようにメタマテリアルは物質創成に電気回路的思考方を導入するため、「物質の回路化」ともいえる。

#### 3.3 フォトリック結晶との違い

メタマテリアルとよく似た人工構造物質にフォトリック結晶がある。光の波長よりも空間的に小さいスケールで人工構造を構成するメタマテリアルに対して、フォトリック結晶では光の波長程度に屈折率 (一般的には誘電率) の周期構造をつくる。よって見た目は似ているが、物理現象が異なる。フォトリック結晶を支配する物理現象は、結晶構造解析で用いるX線回折や電子線回折などと原理は同じで、回折 (ブラッグ反射) である。回折によっても光は曲がり、時には負の方向にも曲がる<sup>(9)</sup>。

さらに固体中で電子がブラッグ反射し、電子のバンド構造を形成することと同様に、フォトニック結晶ではフォトニックバンドが形成される。フォトニック結晶の興味深い性質は主に光が存在できないフォトニックバンドギャップ近辺で起こる。もちろんメタマテリアルもバンドギャップを形成する。しかしながらメタマテリアルはギャップよりも低い周波数の光を使う。そこでは粗視化で有効媒質的に取り扱った屈折率を用いることができる。

ここで負屈折率と光が負の方向に曲がることは異なるので注意が必要である。フォトニック結晶でも特殊な条件を満たせば負の方向に光が曲がる。しかしこれは必ずしも屈折率が負になったことを意味するわけではない。

#### 4. 対称性が破れたメタマテリアル

##### 4.1 構造光学活性と磁気光学効果

対称性が破れた物質は興味深い光学現象を起こす。右手と左手が重ならない（空間反転対称性が破れた）カイラル物質、例えば砂糖、酒石酸、アミノ酸、タンパク質などは構造光学活性をもたらす。これに対して、磁界下での電子の運動のようにビデオ撮影した映像を逆再生した時にありえない現象になる（時間反転対称性が破れている）場合は、磁気光学（MO）効果をもたらす。この二つの現象を組み合わせると、偏光に依存せずに光の進行方向に依存して屈折率が変化する磁気カイラル効果が始まる。

1984年に理論的に予言された磁気カイラル効果<sup>(10)</sup>は、これまでさまざまな天然物質を用いて観測が試みられてきた<sup>(11)</sup>。しかしながら100 mTという磁界の下でその屈折率差は $10^{-10}$ という極めて小さなものであった<sup>(12)</sup>。これは天然物質では構造光学活性とMO効果の結びつきが極めて小さいことに起因する。物質の電気応答や磁気応答を記述する誘電率や透磁率と同様に、構造光学活性はカイラルパラメータで、MO効果はMOパラメータで表される。そこで我々はメタマテリアルの考え方をを用いて、この磁気カイラル効果を増強することに取り組んだ。つまりカイラルパラメータとMOパラメータを異なるメタ原子に担わせて、それを組み合わせることで、マイクロ波から見ると巨大な磁気カイラル効果を持つように振る舞うメタ分子を実現した<sup>(13, 14)</sup>。

##### 4.2 磁気カイラルメタ分子

図3(a)に筆者らが作製した、マイクロ波領域での磁気カイラルメタ分子の写真を示す。銅線をらせん状に巻いて、カイラルメタ原子とした。このカイラルメタ原子は10 GHz付近に構造光学活性を起こした。カイラルメタ原子の中心にフェライトの磁性メタ原子を挿入し、メタ分子を形成する。メタ分子を導波管に挿入し、電磁石で直流磁

界をかけながらベクトルネットワークアナライザでマイクロ波の透過を調べた。可視光とは異なり、マイクロ波では位相差を直接測定できる。図3(b)に表から透過したマイクロ波と裏から透過したマイクロ波の位相差スペクトルを示す<sup>(13)</sup>。無磁界下ではスペクトルは平坦である。ところが直流磁界をかけると、10 GHz付近に分散型ピークが見える。このピークは磁界を反転すると極性が反転する。さらにカイラルメタ原子のカイラリティを切り替えても、ピークの極性が反転する。これらの振る舞いは有限要素法を用いた数値計算で再現できる<sup>(14)</sup>。よってこれは磁気カイラル効果の信号であることが判る。

位相差と強度差から屈折率差を実験的に求めることができる。200 mTの磁界の下では、屈折率差は $10^{-2}$ 程度である。周波数が異なるので一概には比較できないが、天然物質での磁気カイラル効果よりも数桁大きい屈折率差である。また最近の実験では磁性メタ原子での磁気共鳴を用いることで屈折率差が $10^{-1}$ 程度まで増強できることがわかった<sup>(13)</sup>。さらに複数の共鳴を重ねることで、1程度の巨大な屈折率差が得られることが数値計算で予言された<sup>(14)</sup>。

重要なポイントはこのメタ分子はあくまでもプロトタイプであり、その原理がそのまま可視光領域まで適用可能で

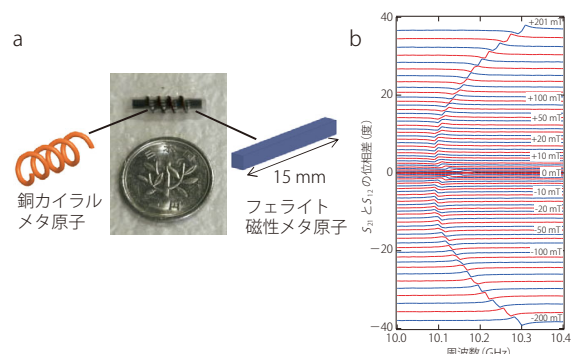


図3 磁気カイラルメタ分子 (a) によるマイクロ波に対する磁気カイラル効果 (b)

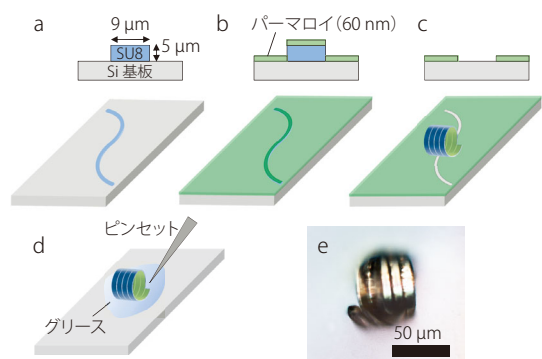


図4 応力誘起自己巻き上げ法で作製したパーマロイ磁気カイラルメタ分子

あるということである。周波数を上げるには、メタ分子を微細化する必要がある。筆者らは図4に示す応力誘起自己巻き上げ法を用いて、鉄とニッケルの合金（パーマロイ）でできた磁気カイラルメタ分子をマイクロメートルサイズまで小型化することに成功している<sup>(15)</sup>。

### 4.3 マジックミラーと人工的ゲージ場

磁気カイラルメタマテリアルはマジックミラーの実現への道を拓く。しかもその光の透過は外部磁界によって切り替えることが可能である。これにより新しい機能性光学素子を生み出すと期待される。また応用のみならず、光にとっての“磁界”のような人工的ゲージ場を実現できることから基礎的にも注目されている。筆者らはすでにカイラルメタ原子のみから構築される非均一カイラルメタマテリアルが、円偏波に依存してマイクロ波を分裂させることを実験的に確認した<sup>(16)</sup>。この現象は量子力学黎明期に電子スピンの存在を実証した Stern-Gerlach 実験の光版ととらえられ、人工的ゲージ場という観点から興味深いと考えられている。

## 5. 音波・弾性波・地震波・熱メタマテリアル

音波は空気の粗密波（縦波）である。横波である電磁波で Veselago が予言した負屈折率媒質のような両負性媒質を、音波に対して実現するためには、密度と体積弾性率を同時に負にすることができれば良いことが知られている<sup>(17)</sup>。2010年には音波に対する導波管を膜で区切って負の密度を、さらに横穴を開けて負の体積弾性率を実現したフルートのような構造にすることで、音波に対する両負性

媒質を実現したと報告があった<sup>(18)</sup>。また弾性波や、最近では地震波のクロークを可能にするかもしれないメタマテリアルも提案されている<sup>(19)</sup>。

またエネルギーの効率利用という観点から、人工構造を用いて熱の流れを制御しようという研究も盛んに行われている<sup>(20)</sup>。熱伝導は波動現象ではなく、拡散現象である。しかしながら熱流密度には、光でのポインティングベクトル同様に連続の式が使える。よってメタマテリアルの概念を適用することができ、熱クロークなどが報告されている<sup>(21)</sup>。これからもメタマテリアルは電磁波とのアナロジーを使ってさまざまな概念と結びつき、新しい領域を切り拓いていくと期待される。

## 6. おわりに

波長よりも十分小さな構成要素を工夫して組み合わせることで天然物質では困難な機能を実現するメタマテリアルについて紹介した。メタマテリアルは現在、研究者の自由な発想のもとでアナロジーを武器にさまざまな方面に展開を始めている。

最後になるが、本稿は多数の研究者との共同研究の成果である。特に澤田桂（理化学研究所 SACLA）、上田哲也（京都工芸繊維大学）、児玉俊之、柳久雄（奈良先端科学技術大学院大学）の各氏にお礼を申し上げます。また日本のメタマテリアル研究を牽引された故・萩行正憲教授（大阪大学）に深く感謝する。本研究は科学研究費補助金（22109005, 26287065）、光科学技術研究振興財団からの援助を受けた。

## 文 献

- (1) V. C. Veselago : "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ", Sov. Phys. Usp., Vol.10, p.509 (1968)
- (2) R. A. Shelby et al. : "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction", Science, Vol.292, p.77 (2001)
- (3) J. B. Pendry et al. : "Magnetism from conductors and enhanced non-linear phenomena", IEEE Trans. MTT, Vol.47, p.2075 (1999)
- (4) J. B. Pendry et al. : "Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostuctures", Phys. Rev. Lett. Vol.76, p.4773 (1996)
- (5) D. R. Smith et al. : "Metamaterials and Negative Refractive Index", Science Vol.305, p.788 (2004)
- (6) D. Schurig et al. : "Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies", Science Vol.314, p.977 (2006)
- (7) N. I. Landy et al. : "Perfect Metamaterial Absorber", Phys. Rev. Lett. Vol.100, p.207402 (2008)
- (8) 堀越・萩行・田中・高野・上田 : 「図解 メタマテリアル」, 日刊工業新聞社 (2013)
- (9) M. Notomi : "Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap", Phys. Rev. B, Vol.62, p.10696 (2000)
- (10) L. D. Barron and J. Vrbancich : "Magneto-chiral birefringence and dichroism", Mol. Phys., Vol.51, p.715 (1984)
- (11) G. L. J. A. Rikken and E. Raupach : "Observation of magneto-chiral dichroism", Nature Vol.390, p.493 (1997)
- (12) M. Vallet et al. : "Observation of Magneto-chiral Birefringence", Phys. Rev. Lett., Vol.87, p.183003 (2001)
- (13) S. Tomita et al. : "Direct Observation of Magneto-chiral Effects

through a Single Metamolecule in Microwave Regions", Phys. Rev. Lett., Vol.113, p.235501 (2014)

- (14) S. Tomita et al. : "Enhanced magneto-chiral effects at microwave frequencies by a single metamolecule", Phys. Rev. B, Vol.95, p.085402 (2017)
- (15) T. Kodama et al. : "Ferromagnetic Resonance of a Single Magneto-chiral Metamolecule of Permalloy", Phys. Rev. Appl., Vol.6, p.024016 (2016)
- (16) S. Tomita et al. : submitted
- (17) J. Li and C. T. Chan : "Double-negative acoustic metamaterial", Phys. Rev. E, Vol.70, p.055602 (R) (2004)
- (18) S. H. Lee et al. : "Composite Acoustic Medium with Simultaneously Negative Density and Modulus", Phys. Rev. Lett., Vol.104, p.054301 (2010)
- (19) S. Brulé et al. : "Experiments on Seismic Metamaterials: Modeling Surface Waves", Phys. Rev. Lett., Vol.112, p.133901 (2014)
- (20) S. Narayana and Y. Sato : "Heat Flux Manipulation with Engineered Thermal Materials", Phys. Rev. Lett., Vol.108, p.214303 (2012)
- (21) M. Kadic et al. : "Metamaterials beyond electromagnetism", Rep. Prog. Phys., Vol.76, p.126501 (2013)



富田 知志

とみた・さとし

2002年神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了, 同4月理化学研究所博士研究員, 同12月JST さきがけ専任研究員, 2006年4月奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科助手, 現在同助教。メタマテリアル科学が専門。博士(理学)。